

TIEMPO UNIVERSAL COORDINADO DEL CENAM: LOGROS Y PERSPECTIVAS

J. M. López Romero, F. Jiménez Tapia.
Centro Nacional de Metrología
km 4.5 Carr. a Los Cués, El Marqués, 76241, Qro., México
Tel. (01 442) 2 11 05 43, e-mail: jlopez@cenam.mx

Resumen: La escala de Tiempo Universal Coordinado, UTC, generada por el Bureau International des Poids et mesures, BIPM, es la referencia internacional de tiempo. Sin embargo, debido a que el UTC es una escala de tiempo virtual sus aplicaciones prácticas son hechas a través de escalas de tiempo reales mantenidas por algunos países como parte de su infraestructura metrológica. En México, el Centro Nacional de Metrología, CENAM, genera la escala de tiempo que constituye la predicción nacional al UTC, el UTC(CNM). En este trabajo se reporta el desempeño del UTC(CNM) para los últimos 3 años evaluando sus características de estabilidad y exactitud.

1. INTRODUCCIÓN

La definición de la unidad de tiempo del Sistema Internacional de unidades (SI), el segundo, adoptada en la 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas en 1967 [1], abrió la posibilidad de realizar la unidad de tiempo con muy alta exactitud. En la actualidad el segundo se realiza con incertidumbres del orden de 1 parte en 10^{15} [2], lo que constituye, dicho sea de paso, la mejor medición hasta ahora lograda por la humanidad. Con la realización de esa nueva definición de la unidad de tiempo se abre también la posibilidad de medir intervalos de tiempo con muy alta exactitud. Sin embargo, la solución de problemas de sincronía a gran escala requiere de un elemento adicional, a saber, escalas de tiempo. En términos breves una escala de tiempo es el resultado de integrar (sumar) unidades de tiempo (que pueden ser, o no, coincidentes con la unidad de tiempo del SI) de manera continua e infinita, en donde el origen (el cero de la escala), una vez fijo, no se mueve. Existen diferentes escalas de tiempo de amplio uso, entre ellas: *i)* la escala de Tiempo Universal, UT1. Esta es una escala de tiempo astronómica cuya unidad básica es definida, y medida, en términos de los movimientos de rotación y traslación de la tierra [3]. *ii)* la escala de Tiempo Atómico Internacional, TAI. La unidad básica de esta escala es coincidente con la definición del SI, y es generada por el Bureau International des Poids et Mesures, BIPM. *iii)* la escala de Tiempo Universal Coordinado, UTC. Esta escala es generada también por el BIPM en base al TAI y al UT1 de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$UTC - TAI = n, \quad (1)$$

$$|UTC - UT1| \leq 0,9s, \quad (2)$$

donde n es un número entero de segundos. La ecuación (1) establece que las diferencias entre el UTC y el TAI son siempre iguales a un número entero de segundos, mientras que la ecuación (2) restringe al UTC para que no difiera del UT1 más allá de 0,9 segundos. De esta forma, la unidad básica del UTC es igual a la unidad del TAI, mientras que el número de segundos del UTC al año depende de las condiciones de rotación de la tierra. Para asegurar el cumplimiento de la condición (2) se requiere introducir periódicamente segundos "bisiestos" al UTC. En caso de ser necesario, estos segundos son introducidos a las 24h00 UTC preferentemente los días 31 de diciembre o 30 de junio, en ese orden. A la fecha se ha acumulado una diferencia de 32 segundos entre el UTC y el TAI, esto es $n = -32$. Es importante indicar que el organismo internacional encargado de tomar la decisión de la inserción, o no, de los segundos bisiestos en el UTC, asegurando el cumplimiento de la relación (1), es el International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) [4].

En la generación del TAI y del UTC el BIPM recibe información de poco más de medio centenar de laboratorios alrededor del mundo los cuales participan con datos de sus escalas de tiempo UTC locales. Las escalas de tiempo locales son denotadas como UTC(k), donde k es un acrónimo especialmente designado para cada laboratorio. Por ejemplo, para el CENAM, $k = CNM$. El algoritmo para la generación del UTC considera la duración de la unidad de tiempo de acuerdo a patrones primarios de frecuencia (relojes atómicos) que han sido sujetos a una evaluación exhaustiva de errores

sistemáticos y cuya exactitud ha sido determinada sin referencia a ningún otro patrón. El número de patrones primarios de frecuencia que contribuyen al UTC de esta manera es reducido (menor que diez), mientras que la continuidad y estabilidad del UTC esta sustentada por la contribución de aproximadamente 250 relojes atómicos comerciales que operan en poco mas de medio centenar de laboratorios. Es importante señalar que tanto el UTC como el TAI son escalas de tiempo virtuales, mientras que las escalas de tiempo UTC(k) y TA(k) son escalas de tiempo reales. Las escalas de tiempo UTC(k) pueden considerarse predicciones al UTC en el sentido de que el UTC es conocido un mes después de que los UTC(k) han sido generados. En la práctica las escalas de tiempo UTC(k) se mantienen con diferencias tan bajas como sea posible respecto al UTC, típicamente estas diferencias son actualmente menores a 200 nanosegundos. Habiendo una recomendación para que los UTC(k) se mantengan dentro de 100 ns respecto del UTC.

2. El UTC(CNM)

El Centro Nacional de Metrología, CENAM, genera la escala de tiempo que constituye la predicción nacional al UTC, el UTC(CNM).

El UTC(CNM) es una escala de tiempo real generada por un conjunto de relojes atómicos que se mantienen en operación continua en los laboratorios de la División de Tiempo y Frecuencia del CENAM. Un reloj atómico de cesio (llamado Reloj Maestro) se mantiene en comparación interna permanente con todos los otros relojes atómicos del CENAM con el objeto de medir, en tiempo real, el desempeño de cada uno de ellos. Esta comparación es hecha por medio de la técnica denominada Comparación de Fase por Doble Mezclador [5]. Bajo este esquema se realiza una medición de fase de las señales de 5 MHz de cada par de relojes atómicos cada segundo, las 24 horas del día, todos los días. Con dichas mediciones es posible estimar la estabilidad en frecuencia de cada reloj atómico y conocer a su vez el desempeño en tiempo real. Adicionalmente el Reloj Maestro se mantiene en una comparación internacional con otros 55 laboratorios utilizando la técnica de vista común del Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

3. COMPARACIÓN INTERNACIONAL DEL UTC(CNM)

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) [6] es un sistema satelital operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para fines de defensa y navegación. El sistema GPS consta de 24 satélites distribuidos en 6 orbitas, con 4 satélites por órbita. Dichas órbitas son semisíncronas con periodos de 11h58 minutos, cada órbita a 55° de inclinación respecto al plano ecuatorial con 22,000 km de radio (4.2 veces el radio de la tierra). El sistema GPS transmite en dos portadoras ubicadas en la banda L, a saber: 1.57542 GHz y a 1.2276 GHz. La emisión se hace utilizando técnicas de espectro disperso lo que hace que la transmisión sea resistente a interferencias naturales e inducidas permitiendo a su vez que la señal de los satélites esté siempre presente en cualquier punto de la tierra. Las señales emitidas por el sistema GPS son generadas por relojes atómicos a bordo en cada satélite. Entre las múltiples aplicaciones del GPS se encuentra la de medición de tiempo ya que el sistema opera bajo principios de sincronía. Parte de la información que envían los satélites es el tiempo de la escala *GPS-time*, la cual es una escala de tiempo propia del sistema.

Una de las técnicas más usadas en la comparación entre relojes atómicos, que están físicamente separados grandes distancias, ubicados en los laboratorios A y B, es la denominada *técnica de vista común del sistema GPS*. Dicha técnica opera básicamente de la siguiente manera: i) tanto el laboratorio A como el laboratorio B realizan mediciones simultáneas de diferencia de tiempo entre su reloj local y un mismo satélite del sistema GPS, ii) ambos laboratorio convienen previamente una agenda común para las observaciones, iii) intercambio de las mediciones realizadas por cada laboratorio. Las mediciones de diferencia de tiempo Δt_{A-S} al tiempo t que realiza el laboratorio A con el satélite S pueden escribirse como

$$\Delta t_{A-S}(t) = T_A(t) - T_{GPS}(t) - D_A \quad (3)$$

donde $T_{GPS}(t)$ es el tiempo del sistema GPS al instante t , mientras que $T_A(t)$ es el tiempo del laboratorio A al mismo instante t , D_A es la suma de retardos en la propagación de la señal del satélite S hasta el receptor en el laboratorio A. De manera similar, las mediciones que realiza el laboratorio B pueden expresarse como:

$$\Delta t_{B-S}(t) = T_B(t) - T_{GPS}(t) - D_B \quad (4)$$

Tomando las diferencias de las mediciones del laboratorio A y del laboratorio B se tiene la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \Delta T_{A-B}(t) &= \Delta T_{A-S}(t) - \Delta T_{B-S}(t) \\ &= T_A(t) - T_B(t) - (D_A - D_B) \end{aligned} \quad (5)$$

Es decir, la contribución del GPS en la ecuación 5 se cancela (al nivel de los nanosegundos) permaneciendo solamente las diferencias de tiempo entre los laboratorios A y B. Los retardos D_A y D_B son función de la posición de los satélites al momento de la comparación, así como de la posición de las antenas GPS de los laboratorios y de los retardos internos de cada receptor GPS. Con esta técnica es posible hacer comparaciones de escalas de tiempo entre pares de laboratorios con incertidumbres del orden de los nanosegundos. Es posible realizar comparaciones al nivel del subnanosegundo utilizando una técnica recientemente desarrollada en la cual se usa la fase de la portadora de la señal del GPS [7].

En el proceso de generación del TAI y del UTC el BIPM utiliza distintas técnicas de comparación entre relojes atómicos, entre ellas se encuentra la de vista común del sistema GPS. El BIPM publica periódicamente la agenda de observaciones de vista común del sistema GPS para 8 grandes regiones del mundo, a saber: *i)* Europa, *Este de Norteamérica*, *ii)* Oeste de Norteamérica, *iii)* Hawai, *Este de Asia*, *iv)* Australia y Nueva Zelanda, *v)* India, *vi)* Medio Oriente, *vii)* Sur de África y, *viii)* Sur de América. Los resultados de las mediciones de vista común del sistema GPS que el CENAM realiza siguiendo la agenda de observaciones del BIPM, modelados por la ecuación (3), son públicos y pueden ser consultados en la página Web del CENAM [8]. Para los propósitos de la agenda de vista común del sistema GPS que el BIPM publica, el CENAM está ubicado en el Oeste de Norteamérica. En este punto es importante indicar que el dominio público de las mediciones de vista común del sistema GPS que el CENAM realiza siguiendo la agenda de observaciones del BIPM hace posible que cualquier laboratorio que aplique dicha técnica y que esté ubicado dentro de la región del Oeste de Norteamérica (lo que incluye todo el territorio mexicano, buena parte del territorio estadounidense y Centroamérica) pueda realizar comparaciones con el UTC(CNM) a discreción.

4. RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN INTERNACIONAL DEL UTC(CNM)

El UTC(CNM) se ha mantenido permanentemente en comparación internacional, con alrededor de medio centenar de laboratorios, desde marzo de 1996. Los resultados de dicha comparación son públicos y pueden ser consultados en la circular T del BIPM. En la referencia [9] se encuentra un análisis de las diferencias de tiempo UTC-UTC(CNM) entre 1996 y 1997. En la referencias [10] se encuentran resultados de evaluaciones mas recientes. En este artículo se muestran y discuten los resultados de la comparación internacional para el periodo comprendido entre enero del 2002 y junio del 2004.

En la figura 1 se muestran los resultados de la comparación del UTC(CNM) con el UTC para el período comprendido entre enero del 2002 y junio del 2004. Durante dicho período la diferencia de frecuencias normalizada δf del UTC(CNM)

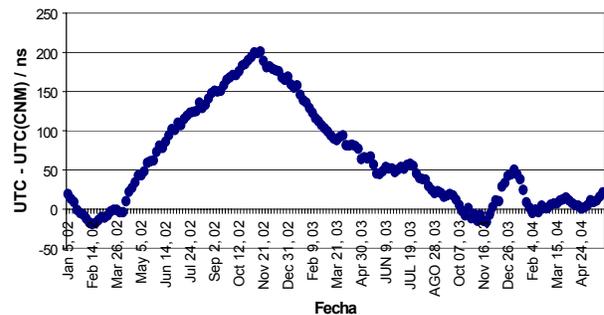


Figura 1. Diferencias de tiempo entre el UTC y el UTC(CNM) publicados en la Circular T del BIPM correspondientes al período de tiempo comprendido entre enero del 2002 y junio del 2004.

respecto al UTC, para tiempos de promediación mayores a un mes, está acotada por los valores $\pm 1.6 \times 10^{-14}$, esto es:

$$-1.6 \times 10^{-14} \leq \delta f \leq +1.6 \times 10^{-14}$$

Las mayores aproximaciones de δf a los límites del intervalo se dieron en el período comprendido entre noviembre del 2003 y febrero del 2004. En el resto del tiempo δf se mantuvo al nivel de las partes en 10^{15} . Es interesante notar el cambio de pendiente ocurrido en siete fechas, a saber: febrero 19 del

2002, noviembre 11 del 2002, noviembre 21 del 2003, enero 5 del 2004 y febrero 9 del 2004, marzo 30 del 2004, abril 29 del 2004. En la mayoría de los casos, dichos cambios de pendiente fueron el resultado de corrimientos en frecuencia practicados en el Reloj Maestro, mientras que en otros los cambios de pendiente fueron manifestaciones de las inestabilidades propias del reloj. En la tabla 1 se muestra la relación de corrimientos de frecuencia que fueron introducidos en el Reloj Maestro de manera intencional.

Tabla 1. Corrimientos intencionales de frecuencia practicados en el Reloj Maestro del CENAM

Corrimientos de frecuencia en el Reloj Maestro		
Fecha	Programado	Observado
15 feb 2002	70×10^{-15}	9.8×10^{-15}
14 nov 2002	101×10^{-15}	-9.8×10^{-15}
12 sep 2003*	-158×10^{-15}	-9.8×10^{-15}
5 ene 2004	-120×10^{-15}	-16×10^{-15}
26 ene 2004	-139×10^{-15}	-16×10^{-15}
2 feb 2004	-146×10^{-15}	-16×10^{-15}
9 feb 2004	-139×10^{-15}	-16×10^{-15}
12 feb 2004	-146×10^{-15}	4.2×10^{-15}
23 mar 2004	-139×10^{-15}	-4.7×10^{-15}

* Cambio de reloj Maestro

De la figura 1 y la tabla 1 se observa que el cambio de pendiente ocurrido alrededor del 21 de noviembre del 2003 no fue producido intencionalmente, sino que el Reloj Maestro sufrió un corrimiento en su frecuencia de manera espontánea. Lo mismo puede ser observado para el 29 de abril del 2004.

El 12 de septiembre del 2003 se reemplazó el Reloj Maestro por otra unidad debido a que se observaron inestabilidades en el UTC(CNM) que indicaron la presencia de los efectos de envejecimiento en el reloj. En esta operación, y con el objeto de mantener la pendiente en el UTC(CNM) constante, se indujo un corrimiento de frecuencia en el nuevo Reloj Maestro de -158×10^{-15} . Es interesante observar la diferencia entre el corrimiento programado y el observado (real), siendo ésta de -148×10^{-15} . Tal diferencia puede ser identificada con la suma total de los efectos sistemáticos presentes en el Reloj Maestro, que es cercana a -1.5×10^{-13} . Aquí se puede observar que una de las ventajas en la participación de la comparación internacional a la cual está sujeto el Reloj Maestro, es que es posible medir la frecuencia del reloj con niveles de incertidumbre de partes en 10^{15} para

tiempos de promediación de un mes o mayores. Evaluando de esta manera la totalidad de los efectos sistemáticos presentes en el Reloj Maestro. Usualmente los fabricantes de este tipo de relojes aseguran que sus instrumentos tienen niveles de exactitud de partes en 10^{12} cuando operan de manera independiente. Sin embargo, cuando éstos participan en una comparación, digamos con el UTC, es posible llevar la operación de éstos artefactos a niveles de exactitud de partes en 10^{14} , conservadoramente.

La figura 2 muestra la estabilidad del UTC(CNM) respecto al UTC medida en términos de la varianza de Allan.

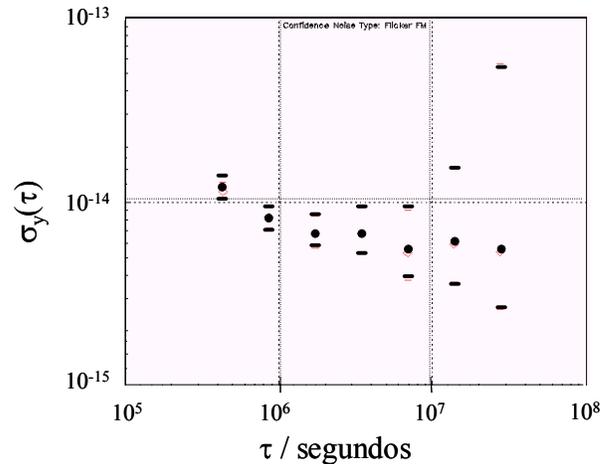


Figura 2. Estabilidad del UTC(CNM) estimada por medio de la varianza de Allan a partir de los datos publicados en la Circular T del BIPM.

Es importante hacer notar que tanto la generación como la comparación internacional el UTC(CNM) se han mantenido sin interrupciones desde marzo de 1996, esto es, desde el inicio de el UTC(CNM). Es interesante notar también que las diferencias del UTC(CNM) respecto al UTC se han venido reduciendo al paso del tiempo. La máxima desviación del UTC(CNM) se alcanzó en diciembre de 1996 fecha en la cual la diferencia UTC-UTC(CNM) fue de $-4.6 \mu s$. La siguiente máxima desviación se alcanzó en abril de 1999 con valores de $1.7 \mu s$. En noviembre del 2002 se alcanzó un máximo local en las diferencias UTC-UTC(CNM) con un valor cercano a $199 ns$. Finalmente, en enero del 2004 se alcanzó un máximo local de $50 ns$, Estas dos últimas desviaciones pueden ser apreciadas en la figura 1.

Con el objeto de comparar el desempeño del UTC(CNM) respecto a otras escalas de tiempo UTC(k), en la figura 3 se presentan las diferencias de tiempo de las escalas UTC(NIST) y UTC(USNO) de los Estados Unidos, UTC(NRC) de Canadá, UTC(KRIS) de Corea y UTC(CNM) de México, respecto al UTC.

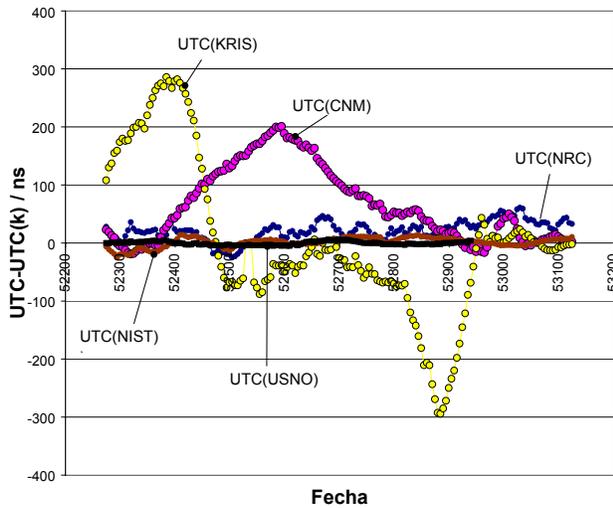


Figura 3. Diferencias de tiempo de las escalas UTC(CNM), UTC(NIST), UTC(USNO), UTC(NRC), UTC(KRIS) respecto al UTC de acuerdo a los resultados publicados por el BIPM en la Circular T para el intervalo de tiempo entre enero del 2002 a mayo del 2004.

De las cinco escalas de tiempo mostradas en la figura 3, tres de ellas son escalas generadas en base a la operación de un solo reloj atómico, esto es, UTC(CNM), UTC(NRC) y UTC(KRIS), mientras que las otras dos son escalas generadas en base a una escala de tiempo promediada, a saber, UTC(NIST) y UTC(USNO). Es interesante notar en la figura 3 que el desempeño de las escalas que son generadas en base a una escala de tiempo promediada es superior al desempeño de las escalas de tiempo que se generan en base a un solo reloj atómico. Es necesario indicar que las características de estabilidad y exactitud del UTC(USNO) hacen de esta escala la mejor escala de tiempo real a nivel mundial. Hay que decir también que en la generación del UTC(USNO) participan alrededor de un centenar de relojes atómicos de Cesio y poco más de una docena de

Máseres de hidrógeno. Por las características de estabilidad, exactitud y continuidad en su generación, las escalas de tiempo que son mostradas en la figura 3 constituyen excelentes referencias de tiempo a nivel internacional.

En la figura 4 se muestran las estabilidades de las cinco escalas de tiempo UTC(CNM), UTC(NIST), UTC(USNO), UTC(NRC) y UTC(KRIS) respecto al UTC. La estabilidad ha sido estimada en términos de la varianza de Allan [5].

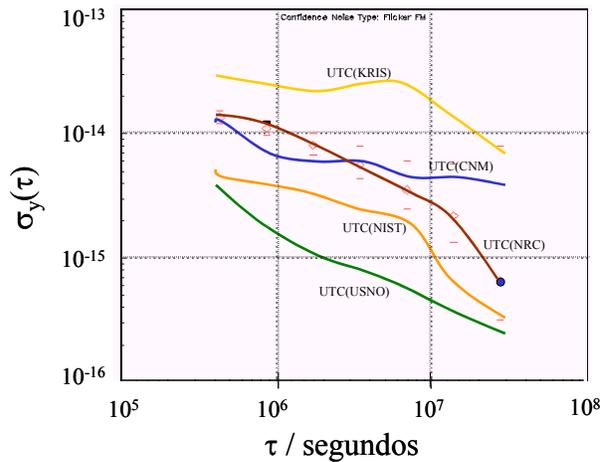


Figura 4. Estabilidad de las escalas de tiempo UTC(CNM), UTC(NIST), UTC(USNO), UTC(NRC) y UTC(KRIS) respecto al UTC medida en términos de la varianza de Allan.

En la figura 4 se puede observar que el UTC(USNO) presenta la mejor estabilidad en esta comparación, seguida por el UTC(NIST). La estabilidad del UTC(CNM) se mantiene, para casi todo τ , en partes en 10^{15} . Las características de exactitud y estabilidad del UTC(CNM) hacen de esta escala de tiempo una magnífica referencia de tiempo a nivel nacional. Es importante hacer notar que el CENAM deriva del UTC(CNM) el tiempo para las tres zonas horarias del país, a saber: Tiempo del Centro, Tiempo de la Montaña, Tiempo del Pacífico. El tiempo que el CENAM genera para estas tres zonas horaria hereda de manera directa las características metrológicas del UTC(CNM), haciendo esto que tales servicios sean de la mayor calidad metrológica, comparables a los mejores del mundo en cuanto a exactitud. La figura 5 muestra la distribución geográfica de las tres zonas horarias del país.



Figura 5. Distribución de geográfica de las tres zonas horarias nacionales: Tiempo del Centro, Tiempo de la Montaña, Tiempo del Pacífico.

La relación del tiempo de cada una de las zonas mostradas en la figura 5 respecto al UTC(CNM) es como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Tiempo del Centro} &= \text{UTC(CNM)} - N \\ \text{Tiempo de la Montaña} &= \text{UTC(CNM)} - (N+1) \\ \text{Tiempo del Pacífico} &= \text{UTC(CNM)} - (N+2) \end{aligned}$$

Donde *N* es un número entero de horas. *N*=5 para el horario de verano (del 1 primer domingo de abril al último domingo de octubre), mientras que *N*=6 para el horario de invierno (del último domingo de octubre al primer domingo de abril). Para mayores referencias sobre los servicios del CENAM referentes a la hora exacta puede consultarse la referencia [8].

5. MEJORAS AL UTC(CNM)

La División de Tiempo y Frecuencia del CENAM desarrolla un proyecto que tiene por objetivo crear una escala de tiempo promediada que opere en base al conjunto de relojes atómicos del CENAM. Las características de estabilidad y exactitud de dicha escala de tiempo promediada serán transferidas al UTC(CNM) utilizando un mecanismo de control automático sobre la frecuencia del Maser Activo de Hidrógeno del CENAM. Bajo este esquema se pretende mejorar la estabilidad del UTC(CNM) en aproximadamente un orden de magnitud y reducir las deferencias UTC-UTC(CNM) a valores que no oscilen más allá de los 20 ns. En estas memorias se encuentra un trabajo [11] en el

cual se presentan y discuten aspectos técnicos de la generación de dicha escala de tiempo promediada, así mismo se presentan los resultados hasta ahora obtenidos de la evaluación del desempeño de la escala.

6. REFERENCIAS

[1] 13ª Conferencia general de Pesas y medidas, 1967.
 [2] Ver por ejemplo: S. Weyers *et al*, "Uncertainty evaluation of the atomic caesium fountain CSF1 of the PTB", *Metrologia*, 2001, **38**, 343 – 352.
 S.R. Jefferts *et al*, "Accuracy evaluation of NIST-F1", *Metrologia*, 2002, **39**, 321 – 336.
 [3] H. Montage Smith, "International Time and Frequency Coordination", *Proc. Of the IEEE*, Vol 60, No 5, May 1972.
 Jean Kovalevsky, "Astronomical Time", *Metrologia*, Vol 1, No 4, 1965
 [4] IERS Product Centre for Earth Orientation Parameters, Observatoire de Paris-SYRTE, Avenue del l'Observatoire – 75014 Paris, Francia.
 [5] "Characterization of Clocks and Oscillators", Edited by D.B. Sullivan *et al*, NIST Technical Note 1337.
 [6] W. Lewandowski and C. Thomas, "GPS time transfere", *Proc. Of the IEEE*, Vol 79, No 7, Julio 1991.
 [7] Kristine Larson and Judah Levine, "Carirer-Phase Time Transfere", *IEEE Transactions, Ferroelectronics and Frequency Control*, Vol 46, 1001 – 1012, 1999.
 [8] Página web del CENAM, www.cenam.mx
 [9] J. M. López-Romero *et al*, "First year results of the international comparison of UTC(CNM)", *Proc. Of the 1997 IEEE International Frequency Control Symposium*, pp. 404-407.
 [10] J. M. López-R, F. Jiménez T., "Cinco años de comparación internacional UTC(CNM) vs UTC: asegurando la generación de una escala de tiempo de clase mundial para México", *Memorias Simposio de Metrologia 2001*, B1-1 – B1-5, Querétaro, México.
 J. M. López-Romero *et al*, "El UTC(CNM): Desempeño y perspectivas de mejora", *Memorias Simposio de Metrología 2002*, 279 – 283, Querétaro México.
 [11] E. Marquina-Cruz y J. M. López-Romero, "Estado Actual del proyecto de la Escala de Tiempo promediada del CENAM", publicado en estas memorias.